

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

Herausgeber:	Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
Redaktion:	Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten Andrea Schneider  Fakultät für Maschinenbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges, Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer, Dipl.-Ing. Silke Stauche
Redaktionsschluss: (CD-Rom-Ausgabe)	31. August 2005
Technische Realisierung: (CD-Rom-Ausgabe)	Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau Dipl.-Ing. Christian Weigel Dipl.-Ing. Helge Drumm Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Technische Realisierung: (Online-Ausgabe)	Universitätsbibliothek Ilmenau <a href="#">ilmedia</a> Postfach 10 05 65 98684 Ilmenau
Verlag:	 Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V. Werner-von-Siemens-Str. 16 98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe):	3-932633-98-9	(978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe):	3-932633-99-7	(978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:  
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

F. Schiedeck / J. Wallaschek

## **Formgedächtnisdrähte als Aktoren in mechatronischen Systemen**

### **ABSTRACT**

Diese Veröffentlichung beschäftigt sich mit Formgedächtnislegierungen als Aktoren. Zu Beginn werden die Grundlagen des thermischen Formgedächtniseffekts erläutert und die Funktionsweise und Eigenschaften von Formgedächtnisdrähten beschrieben. Untersuchungen zur Dynamik sind die Basis für einen qualitativen Vergleich zwischen Formgedächtnisaktoren und Elektromagneten. Abschließend werden Aspekte der Modellierung von Formgedächtnisdrähten aufgeriffen.

### **Motivation**

Obwohl der Formgedächtniseffekt bereits vor mehreren Jahrzehnten entdeckt wurde, findet dieser bis heute noch keine weite Verbreitung als Antriebsprinzip in mechatronischen Systemen. Meist wird auf konventionelle Antriebe zurückgegriffen, auch wenn diese für den jeweiligen Fall nicht optimal geeignet sind. Konventionelle Antriebe sind den meisten Entwicklern vertraut und daher scheinbar einfacher handhabbar als Formgedächtnisaktoren. Um das Potenzial von Formgedächtnislegierungen, insbesondere deren sehr hohe Energiedichte, für eine breite Anwendung nutzbar zu machen, besteht weiterhin Bedarf an der Entwicklung einfach einsetzbarer Systeme mit Formgedächtnisaktoren.

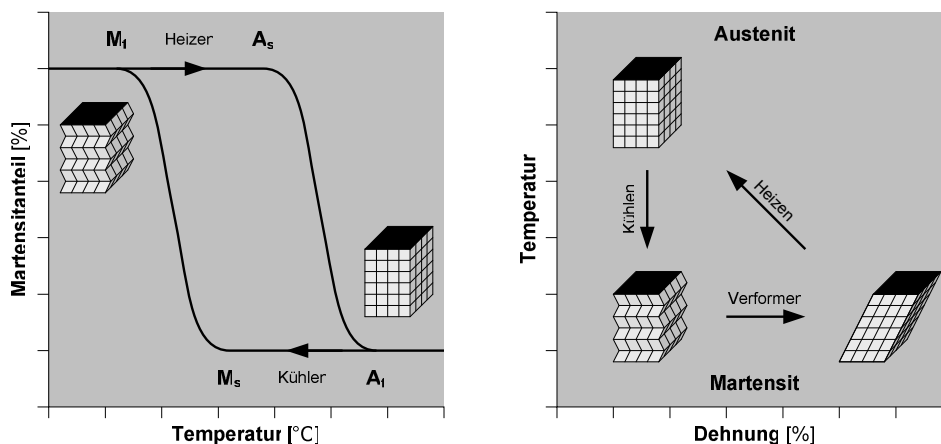
### **Grundlagen des thermischen Formgedächtniseffekts**

Formgedächtnis (FG) bezeichnet die Fähigkeit bestimmter Materialien, sich nach einer Verformung an eine festgelegte Form „erinnern“ zu können. Dieser Effekt kann in Legierungen und Polymeren auftreten, indem sie thermisch, magnetisch oder durch Licht aktiviert werden.

Bei FG-Legierungen basiert dieser Effekt auf einer martensitischen Phasentransformation des Materialgefüges, die sich über einen gewissen Temperaturbereich erstreckt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Legierungen ist dieser Effekt reversibel und reproduzierbar. In Abhängigkeit der Randbedingungen Temperatur und mechanische Spannung treten zwei verschiedene Gefügestrukturen auf. Bei niedriger Temperatur und hoher mechanischer Spannung liegt Martensit

vor, bei hoher Temperatur und niedriger mechanischer Spannung Austenit. In der Martensitphase ist die Legierung leicht verformbar, wohingegen in der Austenitphase eine feste Gefügestruktur eingenommen wird.

Der Umwandlungsgrad ist eine hysteresebehaftete Funktion der Temperatur, die durch die charakteristischen Umwandlungstemperaturen  $A_s$  und  $A_f$  bei der Austenitbildung bzw.  $M_s$  und  $M_f$  bei der Martensitbildung charakterisiert wird. Die Indizes kennzeichnen den Beginn (S für Start) und das Ende (F für Finish) der jeweiligen Phasenumwandlung. Mit zunehmender mechanischer Spannung erhöhen sich die Werte der Umwandlungstemperaturen.



**Abbildung 1: Temperaturhysterese bei der Phasenumwandlung und Spannungsabhängigkeit der Umwandlungstemperaturen**

Am weitesten verbreitet für den Einsatz als Aktoren ist die Legierung Nickel-Titan (Handelsname: Nitinol). Die Austenit-End-Temperatur liegt etwa bei 90 °C, die Hysteresbreite beträgt etwa 30 K. Diese FG-Legierung zeichnet sich v.a. durch eine hohe Lebensdauer, großes Erinnerungsvermögen und hohe Korrosionsbeständigkeit aus.

### **Drähte aus Formgedächtnislegierungen für den Einsatz als Aktoren**

Neben Federn stellen Drähte eine typische Form dar, FG-Legierungen als Aktoren einzusetzen. Der FG-Draht wird einseitig befestigt und an der anderen Seite mit einer Vorspannkraft beaufschlagt. Dies kann u. a. durch eine Gegenfeder, ein Gewicht oder einen antagonistisch wirkenden, zweiten FG-Draht erfolgen. In der Martensitphase wird der FG-Draht durch die Vorspannkraft gedehnt. Durch Temperaturerhöhung bildet sich Austenit, und die mikroskopische Strukturänderung bewirkt eine makroskopische Formänderung. Der FG-Draht verkürzt sich wieder auf seine ursprüngliche Länge und erzeugt dabei eine Zugkraft. Das Heizen kann durch Bestromen erfolgen, wodurch sich der Draht wegen seines ohmschen Widerstandes erwärmt. Wird der Draht nicht mehr beheizt, kühlt er durch Wärmeübergänge zwischen dem heißen Draht und der kühleren Umgebung ab. Während

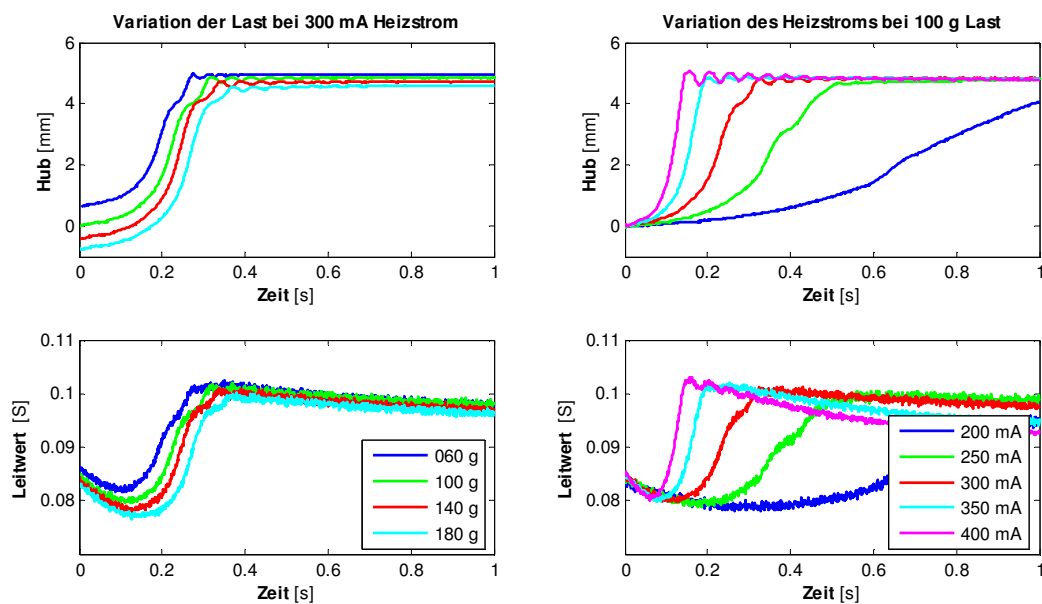
das Heizen aktiv geschieht und durch eine höhere Heizleistung beschleunigt werden kann, ist das Abkühlen ein passiver Vorgang und hängt u.a. von der Umgebungstemperatur ab.

Der Einsatz möglichst dünner Drähte ermöglicht ein schnelleres Ansprechverhalten infolge der nichtlinearen Abhängigkeit der Abkühlrate vom Durchmesser des Drahtes. Die zu kühlende Masse ist proportional zur Querschnittsfläche, d.h., zum Quadrat des Durchmessers. Der Wärmeübergang dagegen ist proportional zur Oberfläche und somit eine Funktion des Durchmessers. In erster Näherung kann daher die Abkühlrate indirekt proportional zum Drahtdurchmesser angenommen werden. Da die Dauer eines Heiz-Kühl-Zyklus im Wesentlichen durch die Abkühlzeit geprägt wird, reduziert sich die Zykluszeit mit abnehmenden Drahtdurchmesser.

Abkühlrate: 
$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{Kühlen}} \sim \frac{A_{\text{Draht}}}{m_{\text{Draht}}} = \frac{L_{\text{Draht}} \cdot \pi \cdot D_{\text{Draht}}}{\rho \cdot L_{\text{Draht}} \cdot \pi \cdot D_{\text{Draht}}^2 / 4} \sim \frac{1}{D_{\text{Draht}}} \quad (1)$$

Durch die Phasenumwandlung der Gefügestruktur ändern sich auch bestimmte Materialeigenschaften. So ändert sich u.a. der spezifische ohmsche Widerstand einer FG-Legierung in Abhängigkeit des Martensitanteils. Der Zusammenhang zwischen Hub eines sich gegen eine Last zusammenziehenden FG-Drahtes und dessen Leitwert ist über einen weiten Hubbereich nahezu proportional. Diese Eigenschaft lässt sich nutzen, um eine Positionsregelung ohne Wegsensor zu realisieren. Dafür ist jedoch eine möglichst einfache Messschaltung zur Bestimmung und Auswertung des ohmschen Widerstandes notwendig.

## Untersuchungen zur Dynamik



**Abbildung 2: Einfluss von Last und Heizstrom auf Leitwert und Hub**

Last und Heizleistung sind wesentliche Einflussgrößen auf die Aktordynamik während des Hubes. Die Messungen wurden an einem senkrecht angeordneten und durch ein Gewicht belasteten FG-Draht mit 100 µm Durchmesser und 100 mm Länge durchgeführt. Die Hubgeschwindigkeit ist von der anliegenden Last nahezu unabhängig, wohingegen ein höherer Heizstrom die Dynamik stark verbessert. Die statische Auslenkung nimmt bei steigender Last linear zu, wobei die unterschiedliche Nachgiebigkeit für Martensit und Austenit zu erkennen sind. Eine höhere Heizleistung ermöglicht keine größeren Hübe.

### **Qualitativer Vergleich mit Elektromagneten**

Drähte aus FG-Legierung für den Einsatz als Aktoren weisen einige qualitative Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu Elektromagneten auf.

Gemeinsamkeiten:

- Beide Antriebsprinzipien erzeugen anziehende Kräfte und wirken daher unidirektional.
- Für die Rückstellbewegung ist eine Gegenkraft erforderlich, die durch eine Gegenfeder, ein Gewicht oder einen entgegengesetzt wirkenden zweiten Aktor erzeugt werden kann.
- Zum Halten einer Position müssen beide Aktortypen bestromt werden, andernfalls kehren sie durch die Gegenkraft in ihre Ruhelage zurück.
- Der Bereich der erforderlichen Betriebsspannung liegt in beiden Fällen bei einigen Volt.

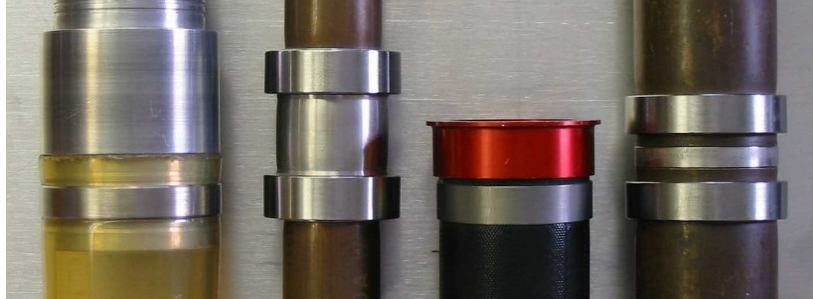
Unterschiede:

- FG-Drähte sind wegen ihrer geringeren Dynamik sehr einfach zu regeln. Mit einem einfachen P-Regler sind gute Positionierungsergebnisse erreichbar. Die höhere Dynamik und instabilen Arbeitspunkte machen die Regelung eines E-Magneten bedeutend aufwendiger.
- Die Anzugskraft eines E-Magneten ist im allgemeinen Fall indirekt proportional zum Luftspalt. FG-Drähte erzeugen über den gesamten Hubbereich in erster Näherung eine konstante Kraftwirkung.

### **Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsbeispiele**

Mit Hilfe von Hülsen aus FG-Legierung ist es möglich, zwei stumpf aneinander gesetzte Rohre zu verbinden. Die Hülsen werden in der Austeniphase mit einem kleineren Innendurchmesser als der Außendurchmesser der Rohre gefertigt, anschließend gekühlt und im martensitischen Zustand aufgeweitet. Bis zur Installation müssen die Hülsen gekühlt bleiben. Nach dem Zusammensetzen der Rohrverbindung kehrt die Hülse durch Erwärmung wieder in ihre Urform zurück. Wird die Hülse

gehindert, ihre Urform vollständig anzunehmen, erzeugt diese eine reproduzierbare Klemmkraft. Solange sich die FG-Hülse in der Austenitphase befindet, bleibt die Klemmkraft erhalten. Durch Abkühlen bis zur Martensitphase geht die Klemmkraft auf Null zurück. Aus diesem Grund muss die Martensit-Start-Temperatur unterhalb der minimalen Umgebungstemperatur liegen.



**Abbildung 3: Klemmhülsen aus Formgedächtnislegierung (Quelle: Intrinsic)**

Will man den Formgedächtniseffekt mehrmals nutzen, muss die Umgebungstemperatur unterhalb der Martensit-End-Temperatur liegen. Die Erwärmung erfolgt durch Bestromen des FG-Drahtes. Mögliche Einsatzfelder für FG-Drähte im Automobil sind Entriegelungssysteme für Tankdeckel und Heckklappen oder die Betätigung des Zentralverriegelungssystems. Ein Problem stellen jedoch höhere Umgebungstemperaturen dar, die oberhalb der Austenit-Start-Temperatur liegen. Dadurch kann es zu einer unerwünschten Selbstaktivierung der FG-Drähte kommen.

### **Modellierung eines Drahtes aus Formgedächtnislegierung**

Eine Möglichkeit der Modellierung eines FG-Drahtes ist das Bilanzieren der zu- und abgeführten Energieströme, welche die innere Energie des Materials beeinflussen. Durch Lösen der thermodynamischen Zustandsgleichung ist es möglich, die aktuelle Drahttemperatur zu ermitteln. In Abhängigkeit der Drahttemperatur ergibt sich der aktuelle Martensitanteil, von dem Materialparameter wie spezifischer Widerstand, E-Modul und thermischer Ausdehnungskoeffizient abhängen und der den Grad der Rücktransformation angibt (siehe auch [3]).

Energiebilanz: 
$$\frac{dU(T)}{dt} = P_{el} - P_{mech} - \dot{Q}_{konv} - \dot{Q}_{strahl} - \dot{Q}_{leit} - \dot{Q}_{transf} \quad (2)$$

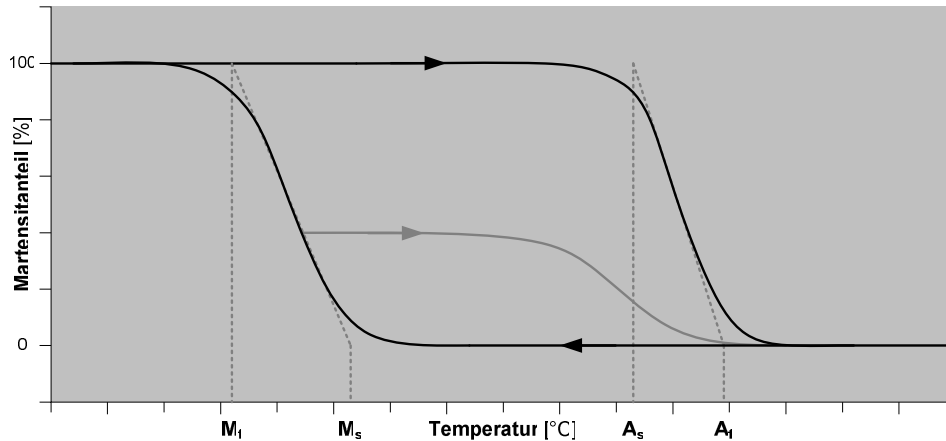
Ein wesentliches Merkmal von FG-Legierungen ist die Temperaturhysterese der martensitischen Phasenumwandlung. Solche Hysteresen lassen sich mit einem Preisach- oder Jiles-Atherton-Modell nachbilden. Für einen ersten Ansatz wird jedoch eine einfache Modellierung der Hysterese gewählt, die lediglich die vier Umwandlungstemperaturen erfordert. Mittels einer trigonometrischen Funktion werden zum einen die äußeren Hystereseäste und zum anderen durch Anpassung des Startwertes innere Hystereseschleifen beschrieben.

Heizen:

$$\xi(T) = \frac{\xi_0}{2} \cdot \tanh\left(\delta \left( \frac{A_s - T}{A_f - A_s} + \frac{1}{2} \right)\right) + \frac{\xi_0}{2} \quad (3)$$

Kühlen:

$$\xi(T) = \frac{1 - \xi_0}{2} \cdot \tanh\left(\delta \left( \frac{M_f - T}{M_s - M_f} + \frac{1}{2} \right)\right) + \frac{1 + \xi_0}{2} \quad (4)$$



**Abbildung 4: Temperaturhysterese Modell**

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Obwohl FG-Legierungen in bestimmten Bereichen klare Vorteile gegenüber konventionellen Aktoren aufweisen können, beginnen sie erst, sich als Antriebskonzepte durchzusetzen. Dies resultiert überwiegend aus mangelndem Wissen potenzieller Anwender und dem Fehlen von Daten zu FG-Legierungen. In Bezug auf Energiebedarf und Kraft-Hub-Verhältnis jedoch können Aktoren mit FG-Legierungen eine sinnvolle Alternative im Bereich kleiner bis mittlerer Leistung darstellen. Abschließend werden wesentliche Aktoreigenschaften von Formgedächtnisdrähten aufgelistet.

Vorteile:

- Geringe Baugröße
- Geräuschloser Betrieb
- Kleine Bauteilanzahl
- Sehr hohe Energiedichte

Nachteile:

- Eingeschränkter Temperatureinsatzbereich
- Relativ geringe Dynamik
- Schwierige Kontaktierung der Drahtenden



**Literatur- bzw. Quellenhinweise:**

- [1] Mertmann, Matthias: NiTi-Formgedächtnislegierungen für Aktoren der Greifertechnik. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1997
- [2] Stork, Holger: Aufbau, Modellierung und Regelung von Formgedächtnis-Aktorsystemen. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1997
- [3] Oelschläger, Lars: Numerische Modellierung des Aktivierungsverhaltens von Formgedächtnisaktoren am Beispiel eines Schrittantriebes. Aachen : Shaker, 2004

**Autorenangabe(n):**

Dipl.-Ing. Florian Schiedeck

Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek

Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Mechatronik und Dynamik

Fürstenallee 11, 33102 Paderborn

Tel.: (0 52 51) 60 61 85

Fax: (0 52 51) 60 62 78

E-Mail: [florian.schiedeck@hni.upb.de](mailto:florian.schiedeck@hni.upb.de)